



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN INGENIERÍA GEOLÓGICA

**ESTUDIO DEL GRANITO DE MARTINAMOR
COMO ROCA DE CONSTRUCCIÓN:
APLICACIONES AL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Daniel Marinero Domingo
2015**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DEL GRANITO DE MARTINAMOR COMO ROCA DE CONSTRUCCIÓN: APLICACIONES AL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Memoria presentada por: DANIEL MARINERO DOMINGO para la obtención
del título de:

GRADUADO EN INGENIERÍA GEOLÓGICA.

Tutora del trabajo: MARÍA DOLORES PEREIRA GÓMEZ.

Cotutor del trabajo: JOSÉ ANTONIO BLANCO SÁNCHEZ.

RESUMEN:

El Granito de Martinamor es una piedra natural que se ha utilizado como material de construcción a lo largo de la historia en la ciudad de Salamanca y alrededores hasta el abandono de las canteras en la década de 1930. Debido a su utilización en construcciones de valor patrimonial histórico, actualmente se propone su utilización como material de restauración, y por ello, se ha realizado una caracterización de sus propiedades físico-mecánicas cuyos resultados han sido sorprendentemente anómalos. En el presente trabajo se hace un estudio en detalle con trabajo de campo y laboratorio incluido, acerca de la caracterización de las propiedades tecnológicas de este granito y la alteración causante de tan anómalos resultados.

ABSTRACT:

Martinamor Granite is a natural stone that has been used as a building material throughout history in the city of Salamanca and the surrounding area until the abandonment of the quarries in the 1930s. Due to its use in highly valued historical buildings, its use in building restoration has been proposed, and therefore, a study of its physical and mechanical properties has been conducted yielding surprisingly anomalous results. This work presents a thoroughly detailed study including field and laboratory research of the technological properties characterization of this granite and the reasons behind the anomalous results.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	4
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ALCANCE	5
4. ANTECEDENTES.....	6
4.1 Contexto geológico	6
4.2 Utilización del Granito de martinamor	9
5. CONOCIMIENTOS PREVIOS	15
5.1 Caracterización de la piedra natural	15
5.1.1 Caracterización petrográfica	16
5.1.2 Caracterización geoquímica	17
5.1.3 Caracterización físico-mecánica	17
5.1.3.1 Densidad y porosidad:.....	18
5.1.3.2 Resistencia a compresión:	18
5.1.3.3 Coeficiente de absorción de agua:.....	18
5.1.3.4 Coeficiente de absorción de agua por capilaridad:	19
5.1.3.5 Velocidad de propagación del sonido:	19
5.1.3.6 Módulo de elasticidad:.....	20
5.1.3.7 Resistencia a las heladas:.....	20
5.1.3.8 Resistencia a los cambios térmicos:	20
5.2 Alteración y degradación de la piedra natural.....	21
5.2.1 Alteración de las rocas en su emplazamiento natural en las canteras	22
5.2.1.1 Alteración física:.....	22
5.2.1.2 Alteración química:.....	23
5.2.2 Alteración y degradación de la piedra natural en el medio urbano	25
5.3 Datos previos	26
6. TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO / RESULTADOS	27
6.1 Toma y tratamiento de muestras	28
6.2 Análisis químicos	30
6.2 Análisis mineralógicos por difracción de rayos x	33
6.3 Identificación petrográfica	35
6.4 Identificación macroscópica.....	37
6.5 Visita a las canteras	38
7. CONCLUSIONES GENERALES	40
8. PROPUESTAS Y ALTERNATIVAS.....	41
9. BIBLIOGRAFÍA.....	42

1. INTRODUCCIÓN

El Granito de Martinamor, también conocido popularmente como “Piedra Pajarilla” es una roca ígnea que se ha utilizado como piedra natural en numerosas construcciones históricas de la ciudad de Salamanca y alrededores.

Las canteras de Martinamor están localizadas en las cercanías del municipio de Martinamor, situado a unos 20 Km al Sur de la ciudad de Salamanca aproximadamente. Su situación es de abandono desde la década de los años 30 y desde entonces, otros granitos, entre ellos su fiel competidor a lo largo de la historia y extraído de las canteras de Los Santos, localizadas a 60 Km al Sur de la ciudad de Salamanca, han sido utilizados en sustitución al Granito de Martinamor.

Existen numerosos estudios científicos que han tratado la génesis, geoquímica, mineralogía y estructuras del Granito de Martinamor, pero muy escasos acerca de su caracterización físico-mecánica y su utilización como material de construcción. Con el fin de dar a conocer la importancia de este granito internacionalmente se han publicado varios artículos a través de las “Geological Society of London Special Publications” (Publicaciones Especiales de la Sociedad Geológica de Londres) en los que actualmente se propone:

- ✚ Su candidatura a ser designado como “*Global Heritage Stone Resource*” (Recurso Natural Global en Patrimonio)
- ✚ Su utilización puntual en futuras restauraciones de construcciones históricas que deban acometerse.

Por ello se han llevado a cabo ensayos físico-mecánicos en muestras de roca fresca (sin alterar) obtenidas en las canteras. Sin embargo y sorprendentemente, los resultados obtenidos ofrecen unas propiedades físico-mecánicas de baja calidad en comparación con otras piedras naturales de granito que se explotan para su uso y comercialización. En el presente trabajo se hará un análisis acerca de las causas de dichos resultados y de las posibilidades de este granito como material de reemplazo, dentro del marco de la conservación y desarrollo del patrimonio histórico-arquitectónico de la Ciudad de Salamanca.


2. OBJETIVOS


Cumpliendo con las normas específicas para los Trabajos de Fin de Grado en Ingeniería Geológica, este TFG se corresponde con los de tipo I+D+i: investigación + desarrollo + innovación (UNE 166.001).

Los objetivos a alcanzar, se pueden integrar dentro de este concepto de la forma siguiente:

Investigación:

- A. Llegar a una conclusión acerca de la causa de tan anómalos resultados obtenidos con respecto a las propiedades físico-mecánicas de la roca presente en los afloramientos de las canteras, para poder hacer una valoración acerca de su estado.
- B. Caracterizar la alteración del Granito de Martinamor y su efecto en la degradación de sus propiedades tecnológicas, tanto en la roca localizada en los afloramientos de las canteras, como en la piedra natural colocada en las construcciones históricas y establecer si existe alguna relación entre ellas.

 **Desarrollo:** contribuir al conocimiento acerca de la conservación y desarrollo del patrimonio histórico-arquitectónico, ya que es considerado parte fundamental del motor cultural, turístico y económico de la ciudad de Salamanca, declarada en 1988 Ciudad Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO y en 2002 Capital Europea de la Cultura por el Consejo y el Parlamento Europeo.

 **Innovación:** ofrecer propuestas de cara a la posible utilización de la piedra natural de Martinamor en el futuro, en función de los resultados obtenidos y conclusiones realizadas acerca de su estado actual en las canteras y en las construcciones históricas de la ciudad.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ALCANCE

Los trabajos que se han realizado y el alcance de los mismos para lograr los objetivos enunciados en el punto anterior, en correspondencia con el concepto de I+D+i de este TFG cumplen con el siguiente orden:

- I. Investigación, a partir de documentos publicados, acerca de:
 - A. La utilización del Granito de Martinamor como piedra natural a lo largo de la historia y de su papel en relación con otras piedras naturales dentro del patrimonio histórico-arquitectónico de la ciudad de Salamanca. Incluyendo trabajo de campo con documentación fotográfica.
 - B. La caracterización y propiedades físico-mecánicas del Granito de Martinamor y comparación de los datos existentes entre las distintas publicaciones.
- II. Investigación, a partir de referencias bibliográficas, de la caracterización de las propiedades tecnológicas de la piedra natural y su degradación, orientado hacia el Granito de Martinamor, objeto de este trabajo.
- III. Investigación mediante trabajo de campo y laboratorio con documentación fotográfica, toma y preparación de muestras, para la realización de análisis geoquímicos y mineralógicos, con estudio de los mismos e interpretación de los resultados.
- IV. Desarrollo de propuestas y alternativas en función de los resultados obtenidos y las conclusiones realizadas.

4. ANTECEDENTES

Debido a la riqueza histórico-arquitectónica de la ciudad de Salamanca y alrededores, existen varias publicaciones sobre la utilización de piedra natural como material de construcción en esta ciudad y sus alrededores, siendo tres, las publicaciones que tienen como objeto principal el uso del Granito de Martinamor y su caracterización: López Plaza *et al.*, 2007; Pereira y Cooper 2014 y Pereira *et al.*, 2015.

Existen otras publicaciones de difusión local que, sin estar dedicadas específicamente a la caracterización del Granito de Martinamor, describen la importancia de este granito en la arquitectura de Salamanca (Pereira y Cooper, 2014 y referencias allí citadas).

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

En Martinamor se localizan dos canteras dentro del mismo cuerpo granítico, una intrusión laminar de dirección próxima a la E-O de anchura (dirección N-S) variable de unos 20 a 100 metros y longitud (dirección E-O) de unos 20 Km. Este cuerpo granítico pertenece al complejo antiformal de Martinamor (figuras 1 y 2) en cuya área se encuentran los siguientes materiales:

- ✚ Metasedimentos pre-ordovícicos pertenecientes a la formación Monterrubio del Complejo Esquisto-Grauváquico.
- ✚ Ortogneises pre-hercínicos de San Pelayo.
- ✚ Granitos deformados hercínicos, tanto de dos micas como turmaliníferos (utilizado en las construcciones históricas), acompañados de pegmatitas.
- ✚ Granitos tardíos porfídicos de dos micas hercínicos.
- ✚ Cobertera terciaria al NO del área.

En cuanto a la historia tectónica, tanto los metasedimentos, como los ortogneises, son los materiales que estaban presentes antes de la orogenia hercínica, que fue un evento geológico de formación de montañas que se dio a finales de la era Paleozoica, entre finales del periodo Devónico (hace unos 380 millones de años) y mediados del periodo Pérmico (hace unos 280 millones de años) con una duración de 100 millones de años. (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Los granitos deformados se consideran sincinemáticos con la fase 2 hercínica, que se caracteriza estructuralmente por una esquistosidad subhorizontal (S_2) y es por lo que los cuerpos graníticos intruyen laminarmente y subhorizontales en los metasedimentos anteriores. Los granitos tardíos son postcinemáticos de fase 3 hercínica, que estructuralmente, pliega todos los materiales anteriores formando así la megaestructura de antiforma abierta y plano axial subvertical (S_3) conocida como “Antiforma de Martinamor” y haciendo que los cuerpos

graníticos adquieran su deformación en concordancia con esta fase 3 hercínica. (Díez Balda, 1986; Díez Balda *et al.*, 1995).

Posteriormente, todos estos materiales fueron afectados estructuralmente, en menor medida, por los esfuerzos tectónicos de la orogenia Alpina, que afectó ampliamente a la Península Ibérica, dando lugar a gran parte de las líneas de relieve actuales. La orogenia Alpina comenzó a principios de la Era Cenozoica, hace unos 55 millones de años y sus etapas centrales de colisión se están dando actualmente. (Tarbuck y Lutgens, 2005).

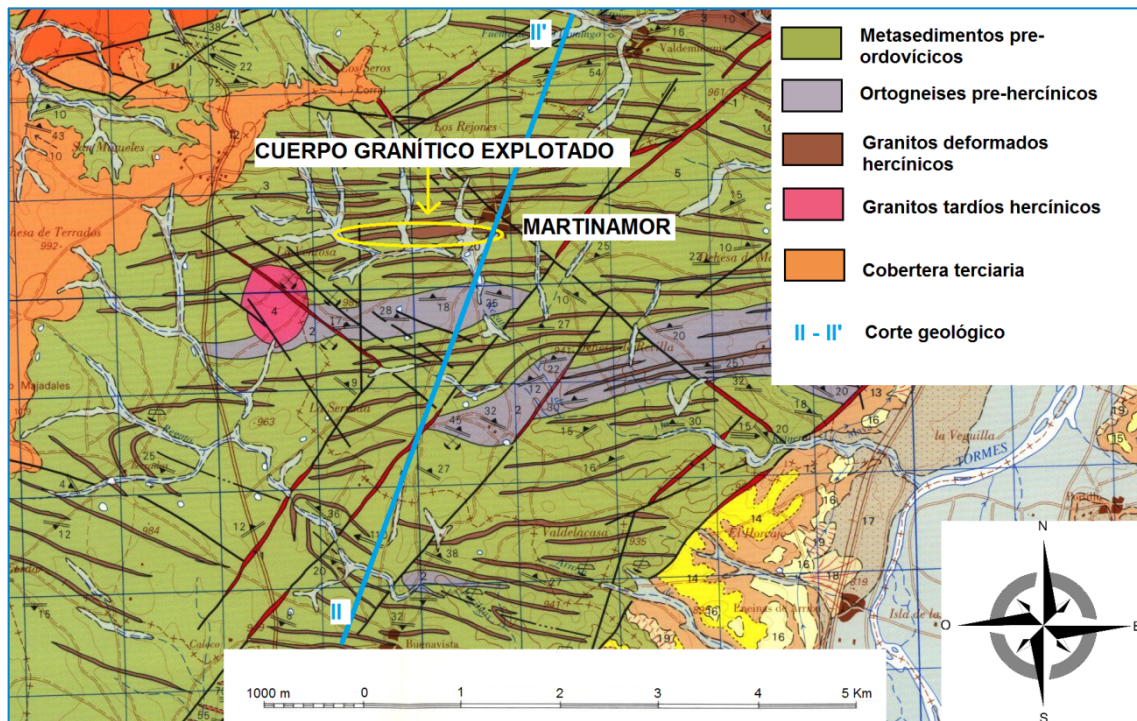


Figura 1. Esquema geológico de la antiforma de Martinamor. Mapa Geológico de España, hoja 503, Las Vegasillas.

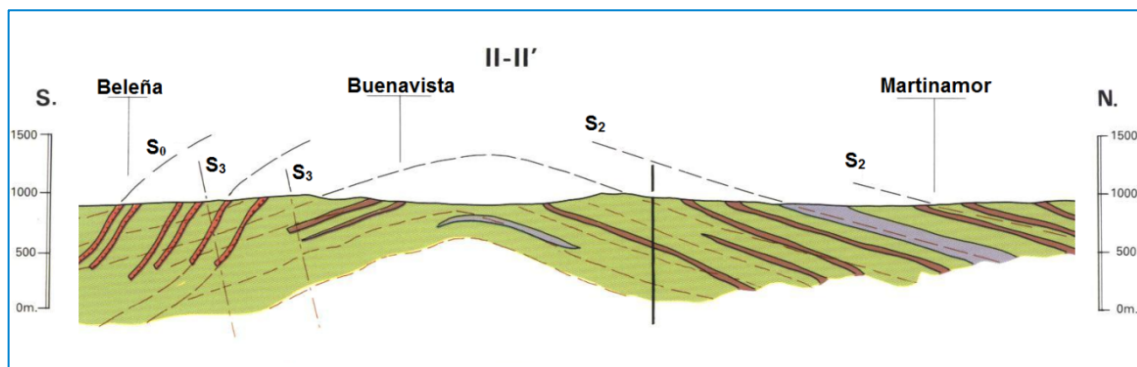


Figura 2. Corte geológico de la antiforma de Martinamor. Mapa Geológico de España, hoja 503, Las Vegasillas.

Petrográficamente, en el cuerpo granítico explotado en las canteras de Martinamor se diferencian las siguientes facies graníticas (López Plaza *et al.*, 2007):

- ✚ **Leucogranitos turmaliníferos de grano grueso** (utilizado en las construcciones históricas. López Plaza *et al.*, 2007). La descripción “*de visu*” se caracteriza por nódulos de turmalina, de tamaño comprendido entre 0.5 y 6 cm mostrando a menudo una orientación por flujo que sobresalen en una mesostasis leucocrática de grano medio-grueso. Al microscopio, sin embargo, se ve que la mesostasis es inequigranular, con cristales de feldespato potásico y plagioclasa que alcanzan 3 mm, mientras que los cristales de cuarzo, no pasan de 0.1 mm. El cuarzo siempre presenta señales de una fuerte deformación plástica (extinción ondulante y subgranos) debido a las fases orogénicas posteriores. Por la forma de los cristales, la textura de la mesostasis es panalotriomorfa-hipidiomorfa, con cristales subidiomorfos (límites rectos y curvilíneos) de plagioclasa albítica y cristales xenomorfos (carecen de límites rectilíneos netos) de cuarzo y feldespato potásico escasamente micropertitizado. La presencia de turmalina (1.4-2.0%), que está restringida a los nódulos alargados y la abundante moscovita y la escasa biotita completan los minerales esenciales. Por último hay presentes escasísimos minerales accesorios como circón y apatito.
- ✚ **Leucogranitos turmaliníferos de grano fino.** “*De visu*”, se diferencian en el tamaño de los cristales de turmalina, que no forman nódulos y no superan 1 cm de longitud. Además es una facies mucho más heterogénea y suelen aparecer estructuras en capas, por lo que estéticamente esta facies no resulta interesante desde el punto de vista de la explotación.
- ✚ **Leucogranitos de dos micas.** Con características texturales de visu similares a los anteriores, pero con mayor contenido en moscovita, sin turmalina y con presencia ocasional de granate.

Dentro del cuerpo granítico las facies se disponen en láminas sucesivas que de muro a techo siguen el siguiente orden: apareciendo por el Sur, leucogranitos de dos micas, seguidos de leucogranitos turmaliníferos de grano grueso, leucogranitos turmaliníferos de grano fino y leucogranitos de dos micas hacia el techo, apareciendo con frecuencia pegmatitas culminando la secuencia y evidenciando una etapa tardía de diferenciación magmática hacia el techo.

Localizado en el flanco norte de la antiforma de Martinamor, el cuerpo, así como los contactos, estructuras magmáticas internas y los planos de foliación (S_2) buzan hacia el norte 5° - 25° como consecuencia del plegamiento de fase 3 hercínica, deduciéndose una potencia máxima de 35 metros (López Plaza *et al.*, 2007).

4.2 UTILIZACIÓN DEL GRANITO DE MARTINAMOR

La ciudad de Salamanca debe su legado arquitectónico a varias piedras naturales autóctonas cuya combinación ha sido clave para resistir al paso de los siglos. Estas piedras son la Arenisca de Villamayor o Piedra Franca, las Areniscas de Salamanca, el Granito de Martinamor y el Granito de Los Santos. (Pereira y Cooper, 2014).

En primer lugar destaca sin duda alguna la Arenisca de Villamayor o Piedra Franca, extraída de las canteras de la localidad de Villamayor, situada a 5 Km al NO de la ciudad de Salamanca. Se trata de una arenisca arcósica-feldespática con cuarzo (40-70%), feldespato (10-30%), micas como minerales accesorios y una matriz rica en arcillas (10-15%) (Vicente y Brufau, 1986; Del Arco *et al.*, 1987; Ordaz, 1983). También contiene localmente turmalina y óxidos de hierro. Estos últimos dan a la roca un aspecto dorado haciendo que esta muestre todo su esplendor cuando recibe la luz del sol durante el atardecer. Los feldespatos, en su mayoría potásicos y en menor medida plagioclasas, se muestran muy alterados. La matriz arcillosa está formada por illitas interestratificadas por montmorillonita y en menor proporción por clorita, caolinita y montmorillonita. El estudio petrográfico muestra que los granos del esqueleto son de tamaño variable, predominando tamaño arena fina y están bien calibrados (buen sorting). En cuanto a la forma, los granos son subredondeados, estando embebidos en la matriz arcillosa sin haber contacto entre grano y grano (matriz-soportados)

Estas características litológicas y petrográficas otorgan a la Arenisca de Villamayor unas propiedades físico-mecánicas determinadas, entre las que destacan altos valores de porosidad hasta un 37% (Iñigo *et al.* 2003) y una alta absorción de agua (14,5%) (Ordaz, 1983). La resistencia a compresión simple es de 25 MPa y en promedio desciende un 90% bajo condiciones de saturación en agua (Pereira y Cooper, 2014 y referencias allí citadas).

La Arenisca de Villamayor es la principal piedra natural de construcción utilizada en Salamanca y alrededores, tanto en las construcciones históricas como en las actuales. En la antigüedad, su facilidad para el corte, el laboreo y la talla permitió realizar tanta filigrana con esta piedra que la llevo a ser objeto imprescindible de una corriente arquitectónica surgida en España a finales del siglo XV, el Plateresco y que se evidencia en su máxima expresión en la fachada de la Universidad de Salamanca. Pero no todo son virtudes en esta piedra, sus altos valores de porosidad, coeficiente de absorción de agua y coeficiente de absorción por capilaridad ($120 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$) (Ordaz, 1983) hacen que cuando se coloca directamente sobre el terreno, la humedad ascienda por los poros provocando una gran degradación estética de la piedra, además de la ya dicha pérdida de resistencia. Por este motivo la Arenisca de Villamayor no es apta para su utilización en la base de los edificios, necesitando recurrir a otras piedras con mejores propiedades para evitar su deterioro.

Las primeras piedras naturales que se utilizaron en la base de las edificaciones se extrajeron de diferentes afloramientos de la Formación Areniscas de Salamanca, situados bajo la ciudad y sus alrededores. Definidas como Formación por Alonso Gavilán (1981) siguiendo las normas de la Guía

Estratigráfica Internacional, son en general una unidad litoestratigráfica siliciclástica formada por capas y compuesta de gravas, areniscas conglomeráticas, areniscas de grano grueso, medio y fino y fangos de Edad Cretácica Terminal-Cenozoico Inferior.

Se halla cementada por sílice y por óxidos de hierro dando a las piedras naturales extraídas una dureza y resistencia a compresión simple (32 MPa) algo mayor que la Arenisca de Villamayor. Pero donde obtiene mayor ventaja respecto a esta es en su comportamiento bajo condiciones saturadas en agua, donde se reduce su resistencia a compresión simple en solo un 44% (18MPa) (Nespereira *et al.* 2010) y es, por lo tanto, más apta para la sillería del basamento de los edificios.

Sin embargo, la distribución, porcentaje y tipo de cementación (sílice y óxidos de hierro) es muy irregular y teniendo en cuenta que la piedra se extraía de diferentes afloramientos, en algunas construcciones se ha comportado más o menos bien, pero en otras, el ascenso capilar del agua desde el suelo la ha ido degradando con el paso de los años (figura 3). Esta degradación, aunque evidente, no es ni mucho menos la que se habría alcanzado si las piezas de sillería que descansan directamente sobre el suelo, en contacto con la humedad fueran de Arenisca de Villamayor.



Figura 3. Degradación por humedad en piedras pertenecientes a la formación Areniscas de Salamanca utilizadas en el basamento de la Iglesia de San Sebastián. Fotografía: D. Marinero Domingo.

La solución definitiva a este problema ya era conocida por los ingenieros y arquitectos de la antigüedad. Sin ir más lejos, en el puente Romano de Salamanca (figura 4), cuya construcción data probablemente de finales del periodo Flavio entre el año 81 y el 98 D.C. (Menéndez Bueyes, 2005) puede observarse como el basamento de los arcos está construido con material granítico procedente de Los Santos. Conociendo este hecho, se utilizaron en primera instancia las piedras naturales pertenecientes a la Formación Areniscas de Salamanca por el ahorro que suponía el laboreo y el evitar el transporte hasta la ciudad. Fue a partir del primer tercio del siglo XVI, cuando los arquitectos empezaron a traer las piedras graníticas de Martinamor y Los Santos.

En concreto, se puede señalar a Juan de Álava, maestro y familiar de canteros, como el introductor del Granito de Martinamor con su utilización en los zócalos de las fachadas de la Catedral Nueva (figura 5) y el Convento de San Esteban.

Estos materiales graníticos se caracterizan por carecer de porosidad y tener muy bajos coeficientes de absorción de agua y capilaridad, lo que hace que sean idóneos para su colocación en el basamento de las edificaciones ya que a la par que no se degradan por el efecto de la humedad, evitan que esta alcance a la Arenisca de Villamayor, situada inmediatamente por encima de ellos.



Figura 4. Bloques de granito procedente de Los Santos utilizados en los arcos del Puente Romano, probablemente entre el año 81 y el 98 D.C.
Fotografía: D. Marinero Domingo.



Figura 5. Diferencia entre la degradación con basamento de Granito de Martinamor (A) y sin basamento (B), en la Arenisca de Villamayor de la Catedral de Salamanca. Fotografías: D. Marinero Domingo.

Durante el siglo XVII, una serie de catástrofes naturales provocaron una depresión económica que se tradujo en el aumento del coste de las obras y dado que el granito era una piedra costosa de extraer y trabajar fueron pocas las construcciones que contaron con los beneficios de su presencia.

El sector de la cantería en Martinamor continuó en decadencia en la primera mitad del siglo XVIII hasta que un desastre natural, paradójicamente, actuó como punto de inflexión de esta tendencia negativa. Se trata del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755), cuyo efecto, provocó importantes daños en muchos de los edificios de la ciudad de Salamanca, entre ellos en la Catedral Nueva, en la que fueron de tal magnitud, que se consideró la posibilidad de derribar su torre ante el peligro de desplome; en la catedral vieja y en el Colegio Mayor de San Bartolomé, que hubo que derribar entero.

A partir de este momento, cambió la concepción acerca del mayor coste que suponía la utilización de materiales de gran calidad y dureza como los granitos, debido a las garantías en cuanto a resistencia y durabilidad que estos podían ofrecer de cara al futuro.

En la restauración de ambas Catedrales se utilizó Piedra de Martinamor. Especialmente, en el refuerzo de la base de la torre de la Catedral Nueva con ocho filas de sillería en declinación para asegurar su estabilidad. En el caso del Colegio Mayor de San Bartolomé, que se construyó de nuevo en los años posteriores como Palacio de Anaya, se utilizó en gran parte de sus elementos arquitectónicos principales, como la fachada incluyendo sus cuatro columnas jónicas, el entablamento y el frontón, las escalinatas, el enlosado, los marcos de puertas y ventanas, así como también las 32 columnas del claustro y la escalera. Esta amplia presencia, prueba también la buena aptitud estética para la arquitectura de la Piedra. Además, la gran calidad de los afloramientos de la época en las Canteras de Martinamor, se ve reflejada en las grandes dimensiones de los bloques de una estancia utilizados en las impresionantes columnas de la entrada principal de este palacio.

A principios del siglo XIX, otro destructivo acontecimiento, la Guerra de la Independencia, acabó con un tercio de la edificación monumental (Núñez Paz *et al.*, 2001). El renacer arquitectónico no se consiguió hasta las últimas décadas del siglo, donde el papel del Granito de Martinamor en las edificaciones fue meramente funcional, siendo relegado al basamento, como se puede apreciar en el Palacio Episcopal (1886-1889) o en la iglesia de San Juan de Sahagún (1891-1896). No obstante, durante este periodo es destacable la utilización exterior en los enlosados y escalinatas de diferentes claustros y calles de la ciudad, como es el caso de la sustitución de las antiguas losas del patio de las Escuelas Mayores o el enlosado de la calle de la Rúa. En este aspecto hay que tener en cuenta una subestimación en la utilización de la Piedra de Martinamor debido a las numerosas modificaciones en los enlosados de calles y plazas que han tenido lugar durante el siglo XX en la ciudad de Salamanca. De este tiempo, al cierre de las canteras en la década de 1930 no tiene lugar alguna aplicación destacables de la piedra pudiendo ser la fecha más tardía de su utilización 1932 (López Plaza *et al.*, 2007) para el zócalo del edificio de la Seguridad Social en la Plaza de los Bandos con una sola hilera de sillares.

A lo largo de la historia ha existido una particular competencia entre el Granito de Martinamor y el Granito de Los Santos por el dominio del segundo lugar en cuanto a utilización de piedra natural dentro del patrimonio histórico-arquitectónico de la ciudad de Salamanca y alrededores. En la actualidad, debido a que el Granito de Martinamor ya no se explota, esa posición la ocupa notoriamente el Granito de Los Santos, pudiendo señalar dos causas primordiales. Por orden de importancia:

1. El potencial de explotación de los afloramientos naturales, que por pertenecer al Batolito Central permiten la extracción de un gran volumen de piedra y unas grandes dimensiones de los bancos de extracción, del orden de la decena de metros, mientras que el cuerpo granítico explotado en Martinamor es una intrusión laminar con una anchura variable de 20 a 100 m, longitud de 20 Km y una potencia máxima estimada de 35 m (López Plaza *et al.*, 2007). Además, en el cuerpo granítico de Martinamor, solo una de las tres facies presentes se ha utilizado en la construcción, reduciendo considerablemente el potencial de explotación de este yacimiento, en comparación al de Los Santos.
2. Posición geográfica de Los Santos dentro de la Vía de la Plata y su continua impulsión comercial debido al transporte de otras materias primas. Además, como consecuencia de esto, la infraestructura de caminos ha sido incesantemente mantenida y mejorada a lo largo del tiempo, todo lo contrario a lo que ocurre en Martinamor.

Sin embargo, en términos petrográficos el Granito de Martinamor ofrece una notablemente mejor estética, puesto que carece de heterogeneidades magmáticas como los enclaves máficos o las estructuras por líneas de flujo que presenta el Granito de Los Santos y además destaca su textura con nódulos de turmalina, que cuando es uniforme otorga a la piedra una extraordinaria belleza representando una analogía con la naturaleza (figura 6), en la que la mesostasis representaría el cielo y los nódulos de turmalina el vuelo de los pájaros. Debido a esto la piedra natural de Martinamor también es conocida dentro de la arquitectura histórica como “Piedra Pajarilla”.



Figura 6. "Piedra Pajarilla" analogía del Granito de Martinamor con la naturaleza. Fotografía granito: D. Marinero Domingo. Fotografía cielo: blog “*Érase una vez Ifamber...*”.

5. CONOCIMIENTOS PREVIOS


Este punto integra los conocimientos y datos previos al trabajo de campo y laboratorio necesarios sobre la caracterización de las propiedades tecnológicas de la piedra natural y su relación con la alteración y degradación de la misma. Aunque estos sirvan para la piedra natural en general, solo se integran aquellos conocimientos que tengan relevancia en el tipo de piedra natural objeto de este trabajo, el Granito de Martinamor.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA PIEDRA NATURAL

La caracterización de las piedras naturales consiste en determinar sus propiedades tecnológicas para así poder diferenciarlas unas de otras a la par que dar a cada una su utilización más adecuada y determinar su comportamiento una vez colocadas en obra, cuando estén sometidas a esfuerzos, a la acción de los agentes atmosféricos y a la actividad humana. Por ello la mayor parte de estas características será de gran importancia para evaluar la resistencia mecánica, estabilidad y durabilidad de parte o la totalidad de las obras en que vayan a ser empleadas.

La evaluación de estas características se obtiene después de someter la roca a distintos ensayos de laboratorio. Tanto la recogida de muestras, como las características de las mismas, los ensayos a realizar y su modo de proceder está normalizado mediante normativas tecnológicas con el fin de garantizar unos requisitos mínimos de caracterización de los productos finales así como poder ser reproducibles para comparar resultados obtenidos en laboratorios y fechas diferentes. Existen diferentes normativas tecnológicas de aplicación dependiendo del país donde se realicen los ensayos y siguiéndose, por lo general, la normativa vigente en el país de destino del producto en cuestión.

En Europa y España la situación normativa actual en cuanto a productos de piedra natural es la siguiente:

-  **Marcado CE de productos de piedra natural:** es una normativa a nivel europeo desarrollada por la Directiva Europea de Productos de Construcción 89/106/CEE, traspuesta al derecho interno español por el Real Decreto 1630/1992 y realizada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), integrado por más de un centenar de comités técnicos con representantes de los países miembros del CEN. El marcado CE es el cumplimiento de unos requisitos mínimos relacionados con la seguridad y un requisito imprescindible legal para que se pueda comercializar, importar, colocar y distribuir un producto. El marcado CE no es una marca de calidad ni implica, por tanto, que el producto ofrezca unas garantías o prestaciones de calidad extras. Las marcas y sellos de calidad siguen existiendo y son estas las que indicaran los extras de calidad ofreciendo un valor añadido al Mercado CE. El marcado CE lo pone, bajo su responsabilidad, el propio fabricante cuando ha realizado las tareas que implican el sistema de evaluación asignado al producto.

- ✚ **Normas UNE-EN (Una Norma Española – Norma Europea):** son las normas incluidas en el Mercado CE publicadas como normas nacionales españolas UNE-EN de modo que su contenido es idéntico al de por ejemplo las normas nacionales alemanas equivalentes (DIN-EN). Donde las Normas UNE y las normas DIN eran las antiguas normas tecnológicas nacionales de España y Alemania respectivamente.
- ✚ **Código Técnico de la Edificación (CTE):** es el conjunto principal de normativas que regulan la edificación en España. No es una normativa específica de Piedra Natural, sin embargo contiene soluciones, criterios técnicos, reglas y condiciones recomendadas acerca de su utilización en la edificación. El CTE está organizado en Documentos Básicos y en cada uno de ellos en el apartado “Ámbito de aplicación” se establece la obligatoriedad o no de cumplir las normas contenidas en el mismo. El CTE entró en vigor con Real Decreto 314/2006 y por lo tanto, las normas de obligado cumplimiento están basadas en las Normas UNE-EN.

5.1.1 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA

Es importante conocer la descripción petrográfica de una piedra natural, primero porque es el principal medio de identificación de las rocas y segundo porque la descripción al microscopio puede poner en evidencia una serie de características que podrían no ser tenidas en cuenta de otro modo como puede ser:

- ✚ Identificación de diferentes facies dentro de un mismo afloramiento.
- ✚ Determinación con precisión del tamaño del tamaño de grano o la existencia de porosidad.
- ✚ Identificación de minerales secundarios producto de alteración de la roca.
- ✚ Grado de fisuración y deformación plástica de los granos minerales.

Estas y otras características pueden tener influencia significativa en el comportamiento del material en su fase de utilización y condicionar su durabilidad con el transcurso del tiempo.

Una buena caracterización debe incluir una descripción macroscópica y microscópica de la roca, cuya metodología a seguir y su mayor o menor amplitud dependerá del tipo de roca en función de las normas utilizadas.

La Norma UNE-EN 12407:2007 es la que regula el estudio petrográfico a realizar en las piedras naturales.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

El conocimiento de la composición química de una roca sirve para poner de manifiesto la presencia de compuestos que, aún en cantidades pequeñas, por ser fácilmente alterables, pueda afectar a la durabilidad de la piedra natural en su fase de utilización. A su vez, también se pueden detectar los propios compuestos producto de la alteración y determinar así su degradación.

No existe ninguna norma UNE-EN que regule la caracterización geoquímica de las piedras naturales. Tal vez porque sea una determinación poco importante para rocas inalteradas.

La caracterización geoquímica de las piedras naturales cobra especial importancia cuando se realizan trabajos de investigación relacionados con la alteración y conservación de materiales pétreos en obras de interés histórico-artístico. Al comparar la composición química de muestras sin alterar y de muestras alteradas se pueden conocer los cambios químicos que haya sufrido la roca original y correlacionar los datos del análisis con la alteración.

Los análisis químicos son un método destructivo de ensayo y por lo tanto cuando se trata de patrimonio, no se debe muestrear a no ser que sea estrictamente necesario y se cuente con los permisos especiales, realizando el muestreo de forma que se dañe lo más mínimo a la construcción.

5.1.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA

El conjunto de propiedades físico-mecánicas de las piedras naturales son la base de su utilización. Sus valores presentan notable interés como indicadores de calidad y contribuyen fuertemente a su durabilidad. Definiéndose la durabilidad de la roca, como la capacidad de la misma de mantener sus propiedades tecnológicas originales con el transcurso del tiempo.

Habiendo hecho mención a la calidad, cabe recordar que las normativas lo que hacen es garantizar unos requisitos mínimos normalizados en la caracterización de las propiedades tecnológicas mientras que los mejores o peores resultados de estas propiedades es lo que determina la calidad de la piedra natural en cuestión.

Existen numerosas propiedades físico-mecánicas normalizadas en piedra natural, en función del tipo de roca, los productos de piedra natural y la utilización a la que estén destinados. En cuanto al tipo de roca, las normas UNE-EN diferencian especialmente entre productos de piedra natural y productos de pizarra; en cuanto a los productos de piedra natural, diferencian entre piezas de piedra natural, baldosas, bordillos, adoquines, placas y plaquetas y en cuanto a utilidades, diferencian entre piezas para fábricas de albañilería, pavimentos, revestimientos, escaleras, además de diferenciar utilización en exterior y en interior. En función de todo esto, la piedra natural se caracterizará teniendo en cuenta unas u otras propiedades físico-mecánicas.

Las propiedades físico-mecánicas a tener en cuenta según los objetivos de este trabajo, los productos de piedra natural elaborados en Granito de Martinamor y su utilización son las siguientes:

5.1.3.1 DENSIDAD Y POROSIDAD:

Por lo general, la densidad se define como la masa dividida entre el volumen de la roca y la porosidad se define como el volumen de poros dividido entre el volumen total de la roca.

Estos dos parámetros están regulados por la misma Norma UNE-EN 1936:2007 debido a que están relacionados inversamente y se obtienen del mismo ensayo. La norma, especifica dos tipos de ensayo para obtener:

- ✚ Porosidad abierta y densidad aparente.

- ✚ Porosidad total y densidad real.

La definición de estos parámetros es única de la Norma UNE-EN 1936:2007 y no tiene por qué coincidir con la definición dada por otras normativas u organismos. La porosidad se expresa en porcentaje.

Para un mismo tipo de roca, cuanto mayor es la densidad, menor es la porosidad y viceversa. La densidad de la piedra natural es necesaria para los cálculos del peso propio de los diferentes elementos de la obra en los que vaya colocada, mientras que la porosidad influye en la resistencia. Para un mismo tipo de roca, cuanto mayor sea la porosidad, menor será la resistencia mecánica a los esfuerzos a los que esté sometida.

5.1.3.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN:

Es el valor máximo de esfuerzos de compresión o aplastamiento que puede soportar una roca. El valor de la resistencia es importante siempre que la roca tenga que soportar cargas elevadas, tanto en su propia utilización como durante el transporte y el almacenamiento. La resistencia a compresión de una roca depende fundamentalmente del tipo de roca y de sus heterogeneidades y por lo general se puede decir que las rocas resisten menos cuando están saturadas en agua que cuando están secas, en el caso de que sean porosas.

La resistencia a compresión está regulada por la Norma UNE-EN 1926:2007 y se expresa en unidades de presión.

5.1.3.3 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE AGUA:

Es un coeficiente que expresa el porcentaje que aumenta el peso de una roca cuando esta se satura en agua a presión atmosférica.

Este coeficiente se relaciona directamente con la porosidad. Cuanto mayor sea esta, la roca absorberá más agua y sus minerales serán más susceptibles al ataque por la propia agua o por otros agentes químicos disueltos en él. El valor de este coeficiente es de suma importancia cuando la piedra natural se encuentra colocada a la intemperie, en contacto con agua o con la humedad del suelo. La norma que regula su obtención es la UNE-EN 13755:2008.

5.1.3.4 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD:

La capilaridad es una propiedad de los líquidos por la cual estos ascienden por un tubo capilar. Debido a que las fuerzas intermoleculares del líquido son menores que las fuerzas de adhesión con las paredes del tubo, el líquido se adhiere a las paredes del tubo y por efecto de la tensión superficial del propio líquido, este asciende hasta que el peso del líquido iguala la tensión superficial.

En rocas, el fenómeno es el mismo, ascendiendo el agua por los poros de la roca, en vez de por un tubo capilar. De igual modo que la capilaridad es inversamente proporcional al diámetro del tubo capilar, en rocas, el ascenso del agua es inversamente proporcional al tamaño de los poros, siendo mayor la altura que alcance, cuanto menor sea el tamaño los poros.

Para que el agua ascienda por capilaridad en una roca esta no solo tiene que tener cierta porosidad, sino que esta tiene que ser efectiva, es decir, que los poros estén conectados entre sí. Debido a esto, el coeficiente de absorción por capilaridad es un parámetro muy a tener en cuenta en piedras naturales que puedan haber adquirido una porosidad secundaria por alteración.

La obtención del coeficiente de absorción por capilaridad está regulada por la Norma UNE-EN 1925:1999 y determina dos coeficientes, C_1 para la absorción perpendicular a los planos de anisotropía de la roca y C_2 , para la absorción paralela a los planos de anisotropía de la roca. El resultado se expresa en $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.

5.1.3.5 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO:

La velocidad de propagación de las ondas de sonido a través de las rocas depende de las propiedades elásticas de las mismas, por lo tanto va a ser muy diferente dependiendo del tipo de roca y de su composición mineralógica.

La velocidad de propagación de las ondas del sonido es inversamente proporcional a la porosidad, independientemente del tipo de roca. Para un mismo tipo de roca, la velocidad de propagación de las ondas del sonido es directamente proporcional a la densidad. El contenido en humedad, también puede tener influencia, reduciendo la velocidad de propagación de las ondas del sonido.

Una de las utilidades de esta propiedad, es poder detectar alteraciones en la roca, ya que la degradación reduce las propiedades elásticas de la misma y con ello la velocidad de propagación de las ondas.

La obtención de la velocidad de propagación de las ondas de sonido está regulada por la norma UNE-EN 14579:2005 y aunque se puede utilizar para determinar el módulo de elasticidad, este tiene su propia Norma UNE-EN.

La principal ventaja de la medida de la velocidad de propagación de las ondas del sonido es que es una medida no destructiva de la roca por lo que se puede realizar *"In situ"* y es por esto que resulta interesante medir esta propiedad en la evaluación del deterioro de piedra natural colocada en construcciones con interés histórico o artístico.

5.1.3.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD:

Mide la relación entre la tensión aplicada y la deformación unitaria de una roca dentro del periodo elástico. Las rocas muy compactas, como los granitos tienen elevados módulos de elasticidad. Para un mismo tipo de roca, cuanto más alto es el módulo de elasticidad, menor es la deformación que sufre bajo tensión. El valor del módulo de elasticidad es fundamental cuando los productos de piedra natural van a cumplir alguna función estructural, como por ejemplo los productos de sillería ya que es necesario para realizar los cálculos estructurales. Las normas que regulan su determinación son la UNE-EN 14146:2004, módulo de elasticidad dinámico y la UNE-EN 14580:2006, módulo de elasticidad estático.

5.1.3.7 RESISTENCIA A LAS HELADAS:

La resistencia de la piedra natural ante el fenómeno de las heladas, que hace aumentar el volumen del agua que se encuentra en los poros o fracturas de la misma por congelación, puede ser importante cuando la piedra se va a utilizar en exteriores, en zonas geográficas con climas húmedos y fríos. Su determinación está regulada por la Norma UNE-EN 12371:2002.

5.1.3.8 RESISTENCIA A LOS CAMBIOS TÉRMICOS:

La resistencia frente a los cambios de temperatura, puede ser importante en zonas geográficas con ciclos de temperaturas extremas entre el día y la noche, cuando la piedra natural es utilizada a la intemperie. La Norma UNE-EN 14066:2003 determina la resistencia al envejecimiento por choque térmico.

Respeto al efecto de la temperatura en la piedra natural, también puede ser importante conocer el coeficiente lineal de dilatación térmica, sobre todo cuando se trata de piezas de sillería o albañilería con función estructural, con el fin de proveer a las construcciones de las juntas de dilatación necesarias, según su diseño arquitectónico. Su determinación está regulada por la Norma UNE-EN 14581:2006.

5.2 ALTERACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA PIEDRA NATURAL

Se entiende por alteración, cualquier modificación de la piedra natural, implique o no un empeoramiento de sus propiedades tecnológicas, mientras que se entiende por degradación de la piedra natural, el empeoramiento de sus propiedades tecnológicas, respecto al tiempo. En esta medida, dentro de la caracterización de la piedra natural, o adicionalmente, es importante identificar y caracterizar la alteración y degradación que haya podido sufrir la piedra, para predecir su comportamiento a lo largo de su vida útil.

La alteración de las rocas se puede entender como un proceso de adaptación al medio en constante variación que las rodea, de esta forma las rocas que por ejemplo han sido elevadas por esfuerzos tectónicos, se encuentran sometidas a un ambiente más agresivo por la mayor energía de las condiciones meteorológicas. Lo mismo ocurre cuando las rocas son extraídas y colocadas en obra en el medio urbano, donde el ambiente que las rodea es diferente al de su emplazamiento original en las canteras y por ello se alteran. Los agentes responsables de la alteración van a ser los mismos en el medio natural, que en el medio urbano (añadiendo la actividad humana), sin embargo la alteración va a ser diferente dependiendo de las características de cada propio medio y la exposición de las rocas a los agentes y factores de alteración, dentro de los mismos.

Cuando la piedra natural se extrae, la caracterización de sus propiedades tecnológicas, incluye el efecto de la alteración que ha sufrido en su emplazamiento natural en las canteras hasta ese momento, pero como el medio donde va a ser colocada puede ser muy diferente, es necesario conocer los procesos y la alteración sufrida por las rocas, tanto en su emplazamiento natural, como en el lugar de su colocación en obra con el fin de predecir por comparación entre ambos, la degradación que va a sufrir la piedra natural durante su vida útil en las construcciones.

Estos conocimientos también pueden ser útiles para estimar o tener una idea general de la degradación de las propiedades tecnológicas de la piedra natural a lo largo de su utilización en las construcciones, por correlación, cuando se tienen datos de las características tecnológicas de la roca fresca en las canteras, ya que la caracterización en las construcciones resulta difícil por incluir ensayos destructivos de la roca.

5.2.1 ALTERACIÓN DE LAS ROCAS EN SU EMPLAZAMIENTO NATURAL EN LAS CANTERAS

Las rocas de la superficie terrestre o sus proximidades están continuamente cambiando debido a la acción de los procesos externos a los que están sometidas, que son los siguientes:

- ✚ **Meteorización:** fragmentación física y alteración química de las rocas de la superficie o cerca de ella.
- ✚ **Procesos gravitacionales:** movimiento de las rocas en la superficie terrestre por el efecto de la gravedad.
- ✚ **Erosión:** eliminación de material por agentes físicos dinámicos como el agua, el viento o el hielo.

Por definición, la alteración que estos procesos llevan a cabo de forma conjunta en las rocas se puede subdividir en dos tipos, física y química y aunque se dan a la vez, una no implica a la otra y viceversa. Ambas se relacionan entre sí en que dependen fuertemente del tipo de roca y sus características, además de los agentes y factores de alteración de los propios procesos externos.

Los agentes que intervienen en la alteración, como el agua, el viento o el hielo están condicionados por el clima, su energía y su agresividad hacia las rocas. Los factores climáticos, en particular la humedad y la temperatura son cruciales para la alteración de la roca. Además, asociados al clima intervienen otros factores como la cantidad de vegetación o de materia orgánica, que influyen en los compuestos químicos presentes en el medio susceptibles de ser disueltos por el agua y formar reacciones.

Los medios de alta energía son óptimos para la alteración física, mientras que los medios con temperaturas cálidas y alta humedad lo son para la alteración química.

5.2.1.1 ALTERACIÓN FÍSICA:

Es la alteración que se produce sin que se den cambios químicos de composición en las rocas, dando lugar a los siguientes fenómenos:

- ✚ **Fragmentación por el hielo:** se da en ciclos repetidos de congelación y deshielo del agua que se encuentra en los poros y fracturas de las rocas, por el aumento de volumen del agua cuando pasa de fase líquida a fase sólida.
- ✚ **Descompresión:** se da en los granitos cuando grandes masas de roca ígnea quedan expuestas debido a la erosión. Esta, elimina las rocas que se encontraban por encima y que ejercían presión sobre el cuerpo ígneo, produciéndose así una descompresión y expansión del cuerpo intrusivo que fractura las rocas en bloques concéntricos al mismo cuerpo en su superficie.

- ✚ **Actividad biológica:** las raíces de las plantas, pueden crecer entre las fracturas de las rocas en busca de agua y conforme crecen, ejercen presiones entre las fisuras que pueden resquebrajar la roca.
- ✚ **Precipitación de sales:** las sales disueltas en el agua que circula por las fisuras y porosidad de las rocas pueden precipitar por exceso de concentración y aumentar su volumen ejerciendo presiones entre los poros y las fracturas que pueden incluso llegar a resquebrajar la roca.
- ✚ **Esfuerzos tectónicos:** las rocas que se encuentran en zonas de esfuerzos tectónicos, como los orógenos, sufren los mayores deterioros físicos, ya que las rocas son altamente rígidas y responden frágilmente, fracturándose ante dichos esfuerzos. Además las rocas que han sido afectadas por esfuerzos tectónicos sufren fuertes anisotropías.

5.2.1.2 ALTERACIÓN QUÍMICA:

Es la alteración por la cual los minerales constituyentes de las rocas se transforman en otros o se liberan al ambiente circundante. Los fenómenos químicos de alteración son los siguientes:

- ✚ **Disolución:** el agua que circula por los poros y las fisuras de las rocas puede disolver los minerales separando sus iones por interacción electrostática debido a la polaridad de las moléculas de agua, eliminándolos de la roca e incorporándolos al agua. Aunque la mayoría de los minerales son insolubles en agua pura, la presencia de elementos disueltos en el agua puede originar ácidos y dar lugar a reacciones de hidrólisis entre el fluido y los minerales, aumentando así el grado de alteración. Un ejemplo es la formación de ácido carbónico, que disuelve gran parte de las rocas, cuando el dióxido de carbono de la atmósfera se disuelve en las gotas de lluvia.
- ✚ **Oxidación:** ocurre en las rocas que contienen minerales ricos en hierro como el olivino, el piroxeno y la hornblenda. El proceso se produce cuando el oxígeno se combina con el hierro para formar óxido férrico de color rojizo denominado hematites. Aunque la oxidación del hierro progresa muy lentamente en ambientes secos, la adición de agua aumenta enormemente la velocidad de reacción por un proceso de liberación de hierro de la estructura del silicato, conocido como hidrólisis.
- ✚ **Hidrólisis:** El grupo mineral más común en las rocas, el de los silicatos, se descompone sobre todo mediante este proceso, que consiste básicamente en la reacción de cualquier mineral con el agua. El agua pura, se disocia en iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-) y son los hidrógenos H^+ los que atacan y sustituyen a otros iones positivos encontrados en la red cristalina de los minerales. En la naturaleza el agua normalmente contiene otras sustancias que contribuyen con hidrógenos adicionales acelerando el proceso.

La alteración química de los granitos en función de su composición mineralógica se da de la siguiente forma:

- ✚ **Alterabilidad del cuarzo:** el cuarzo (SiO_2) es un mineral muy resistente que pertenece a la subclase de los tectosilicatos. Prácticamente no sufre ningún tipo de alteración química.
- ✚ **Alterabilidad de los feldespatos:** los feldespatos son un sistema ternario, que pertenece a la subclase de los tectosilicatos, compuesto de ortoclasa (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Su alteración se da por hidrólisis, donde los iones (H^+) atacan y sustituyen a los iones potasio (K^+) en la estructura del feldespato, alterando así la red cristalina. Una vez retirado, el potasio se convierte en la sal soluble bicarbonato potásico (KHCO_3), que puede incorporarse en otros minerales o ser transportado. Los productos más abundantes de la descomposición química de los feldespatos son los minerales de la arcilla, caolinita e illita. Los minerales de la arcilla (filosilicatos) son los productos finales de la alteración química y son muy estables en condiciones superficiales. La disminución de feldespato potásico y la presencia de minerales de arcilla es indicador del grado de alteración del granito por hidrólisis. El aumento en contenido de filosilicatos y minerales arcillosos se traducirá en una roca alterada como el granito en un aumento del material volátil obtenido en el ensayo de calcinación.
- ✚ **Alterabilidad de las micas:** las más comunes son la biotita, filosilicatos de Fe y Al y la moscovita, filosilicatos de K y Al. Ambas son minerales mucho más blandos que el cuarzo y los feldespatos y tan alterables químicamente como los feldespatos, dando también origen a filosilicatos: clorita por parte de la biotita e illita por parte de la moscovita. La clorita es un aluminosilicato de Fe y Mn y la illita es un aluminosilicato de Mg y Fe.
- ✚ **Alterabilidad de los minerales máficos:** los minerales máficos, como el olivino, el piroxeno, el anfíbol y la biotita, ricos en Mg y Ca, son los primeros minerales en cristalizar a partir del magma según la serie de Bowen, a gran profundidad y por lo tanto son inestables en condiciones superficiales, siendo minerales altamente alterables.
- ✚ **Alterabilidad de los sulfuros:** las rocas graníticas pueden incluir sulfuros como minerales accesorios. Los más comunes son los de hierro, que se alteran formando sulfatos y óxidos.

5.2.2 ALTERACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA PIEDRA NATURAL EN EL MEDIO URBANO

Los procesos de alteración y degradación que afectan a la piedra natural colocada en el medio urbano son los mismos que en el medio natural pero añadiendo las siguientes consideraciones:

- ✚ **Exposición de la piedra natural:** en las canteras, la exposición de la roca a los agentes y fenómenos de alteración depende de las características estructurales del macizo rocoso del que se pretende extraer la piedra natural. En la etapa de estudios previos de la explotación de la cantera, se evalúa la forma de acceder a la roca fresca (sin alterar), que se encuentra en el interior de los afloramientos recubierta por la misma roca u otras rocas adyacentes. Para ello se retiran estas rocas superficiales de forma que se pueda extraer la roca fresca con las mejores propiedades tecnológicas posibles. Por otro lado, cuando la piedra natural está colocada ya en obra, está expuesta directamente a los agentes y procesos de alteración y por lo general la alteración y consecuente degradación de la piedra natural va a ser mayor una vez se coloque en las construcciones.
- ✚ **Contaminación atmosférica:** la contaminación del aire, motivada por la actividad industrial y el aumento de la población en núcleos urbanos supone la presencia en el aire de sustancias nocivas que serán acusadas especialmente por la piedra natural. Las fuentes de emisión de contaminantes, aunque importantes, no serán las que establezcan la cantidad y calidad de los contaminantes ya que intervienen otros factores como las condiciones meteorológicas, particularmente del viento, que es el encargado de la dispersión y transporte horizontal de estas sustancias. Por último el agua de la lluvia se mezcla con estas sustancias y las traslada a las rocas a través de los poros y las fisuras. Algunas de las sustancias gaseosas contaminantes son el dióxido de carbono, el sulfato cálcico o los ácidos clorhídrico, fluorhídrico y amónico. Por sí solas estas sustancias no suelen ser verdaderamente dañinas, siendo solo significativas en calizas o mármoles, pero en combinación con el agua, forman reacciones que pueden alterar cualquier tipo de piedra natural.
- ✚ **Colocación de la piedra natural:** el uso al que está destinada la piedra natural puede influir en su alteración, por ejemplo si se utiliza para elementos constructivos en contacto directo con la humedad del suelo o en pavimentos mal drenados con acumulaciones de agua, estos elementos van a estar más expuestos a la alteración que los que estén situados a cierta altura. La incompatibilidad de materiales también es importante ya que si se utilizan dos piedras naturales con diferente susceptibilidad a la alteración en contacto, los productos de alteración de la más susceptible van a afectar a la otra piedra natural. Esto se puede observar en piedras naturales con anclajes de hierro o con distinto contenido en hierro, donde la alteración por óxidos de hierro puede afectar y manchar a otras piedras sanas.

5.3 DATOS PREVIOS

En las publicaciones indicadas en los antecedentes, se han encontrado los siguientes datos acerca de la caracterización de las propiedades físico-mecánicas del Granito de Martinamor y que han sido el motivo del trabajo de campo y de laboratorio

Por un lado se encuentra la publicada por López Plaza *et al.*, 2007 realizada por La Unidad Asociada “Química del Estado Sólido” formada por miembros de la Universidad de Salamanca y del IRNA/CSIC dentro de los proyectos para el estudio de los procesos físico-químicos que tienen lugar en los materiales ornamentales cuando se someten a actuaciones de prevención, conservación y restauración.

Y por otro se encuentra la publicada por Pereira *et al.*, 2015 donde las muestras para realizar las probetas de roca a ensayar se recogieron de bloques, supuestamente de roca fresca (sin alterar) que estaban abandonados en una de las canteras de antigua explotación. Además se especifica que ha sido realizada de acuerdo a la normalización UNE-EN 1936:2007, UNE-EN 1925:1999 y UNE-EN 1926:2007.

TABLA 1. COMPARACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICOS PUBLICADOS DEL GRANITO DE MARTINAMOR

Parámetros medidos	López Plaza <i>et al.</i> , 2007	Pereira <i>et al.</i> , 2015
Densidad	2.653 g/cm ³	2.589 g/cm ³
Porosidad	0.779%	2.4%
Resistencia a compresión	n.d.	135 MPa
Coefficiente de absorción de agua	0.292%	0.9%
Coefficiente de absorción por capilaridad	0.0000731 g/cm ² · s ^{1/2}	7.66 g/cm ² · s ^{1/2}
Ultrasonidos		
V _x	3636.8 m/s	3230 (3190)* m/s
V _y	3653.6 m/s	3050 (3580)* m/s
V _z	3562.4 m/s	2990 (3310)* m/s
Color		
L	66.48	n.d.
a	-0.18	
b	0.41	

n.d. = no determinado. *los datos entre paréntesis fueron obtenidos con un lote diferente de muestras.

6. TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO / RESULTADOS

Al observar los resultados de las caracterizaciones físico-mecánicas publicadas lo primero que llama la atención son los distintos resultados de la caracterización de 2015 respecto a la de 2007, concretamente respecto a los parámetros de porosidad, de coeficiente de absorción de agua y de coeficiente de absorción por capilaridad. Técnicamente estos valores no son comparables, ya que en la caracterización de 2007 no se especifica que se haya seguido la normativa UNE-EN. Aun así, sirven a modo de orientación para intuir que los valores de 2015 no son buenos para una piedra natural que ha sido utilizada con éxito a lo largo de los siglos.

El siguiente paso, fue comparar estos valores con los de otros granitos comerciales u otras piedras naturales que cumplan con el Mercado CE y la correspondiente normativa UNE-EN:

- ✚ El Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción (INTROMAC), con acreditación ENAC como laboratorio de ensayos según Norma UNE-EN 17025. Ofrece como valores medios de las características técnicas de la piedra natural en general un coeficiente de absorción de agua de 0.2% y una porosidad abierta del 0.6%.
- ✚ En la página web www.gradesa.net, de las canteras de Granito Gris Los Santos, comercializado actualmente, indican un coeficiente de absorción de agua del 0.30%.
- ✚ En la página web www.granitoscaceres.com, el granito comercial Gris Quintana tiene un coeficiente de absorción de agua de 0.2% y un coeficiente de absorción de agua por capilaridad de $0.0000372 \text{ gr/cm}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$. con informe INTROMAC 0893/06.

Teniendo ya la certeza de que las propiedades físico-mecánicas obtenidas en el último trabajo de caracterización del Granito de Martinamor no son buenas para su utilización, se han realizado los siguientes trabajos de campo y laboratorio con el fin de identificar si la alteración es la causante de los distintos valores de las propiedades tecnológicas de este granito en las canteras y comprobar si también se ha dado dicha alteración y consecuente degradación en la piedra natural colocada en las construcciones históricas de Salamanca:

- ✚ Análisis químicos de elementos mayores y trazas.
- ✚ Análisis mineralógicos por difracción de rayos X por el método de polvo.
- ✚ Identificación petrográfica de la alteración mediante observación de láminas delgadas al microscopio.
- ✚ Identificación macroscópica “*De Visu*” en monumentos con presencia de piedra natural de Martinamor.
- ✚ Visita a las Canteras de Martinamor.

6.1 TOMA Y TRATAMIENTO DE MUESTRAS

Para la realización de los análisis químicos y mineralógicos por difracción de rayos X, se utilizaron como muestra las mismas probetas cúbicas de roca (figura 7) que las utilizadas para los ensayos de la caracterización físico-mecánica publicada por Pereira *et al.*, 2015. En el laboratorio de molienda de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, primero se trituraron en una machacadora de mandíbulas y posteriormente se molieron mediante vibración en el molino de aros excéntricos hasta conseguir el polvo de roca con el tamaño de grano adecuado para poder realizar ambos análisis. El polvo de roca resultante se introdujo en un recipiente de plástico para muestras y se etiquetó como “*Martinamor 1*”, que corresponde a la muestra de roca fresca de las canteras de Martinamor.



Figura 7. Probetas de roca utilizadas en la obtención del polvo de roca mediante trituración y molienda. Fotografía: D. Marinero Domingo.

Por otro lado, se tomaron unos 5 gramos aproximadamente de muestra de roca producto de la alteración, de la parte interna de placas o costras despegadas, pero no caídas, del basamento de la Iglesia de San Juan de Sahagún (figura 8), situada en la calle Toro de Salamanca, mediante raspado con un instrumento metálico, intentando no recoger productos de la suciedad del monumento, como polvo o materia orgánica e intentando dañar lo menos posible el monumento. Posteriormente la muestra se molió manualmente con mortero de ágata en el laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, hasta alcanzar el mismo tamaño de grano necesario para la realización de dichos análisis. El polvo de roca resultante se colocó en dos tubos de ensayo de plástico para muestras y se etiquetaron ambas como “*Martinamor 2*”, correspondiendo con las muestras de roca alterada en el medio urbano de Salamanca.

El motivo por el cual se escogió la iglesia de San Juan de Sahagún para recoger la muestra alterada fue porque es una de las construcciones históricas en la que mejor se reconocen macroscópicamente los signos de la alteración, como se verá más adelante.






Figura 8. Basamento de la Iglesia de San Juan de Sahagún de donde se tomaron muestras de roca alterada. Fotografía: D. Marinero Domingo.

6.2 ANÁLISIS QUÍMICOS

Con el fin de identificar compuestos químicos susceptibles de alteración química y compuestos químicos producto de esa misma alteración, tanto en la muestra de roca fresca, “*Martinamor 1*”, como en la muestra de alteración recogida en la Iglesia de San Juan de Sahagún, “*Martinamor 2*”, ambas se llevaron a analizar al Servicio General de Análisis Químico Aplicado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, donde realizaron para cada muestra, la determinación de elementos mayores, traza y material volátil.

Siendo la clasificación de los elementos geoquímicos la siguiente:

-  Elementos mayores >1,0% peso.
-  Elementos menores 0,1 – 1,0% peso.
-  Elementos trazas <0,1% peso.

La primera tarea que debe realizar el laboratorio, es la disolución total de la muestra, mediante reacciones químicas con el fin de evitar fallos, tanto en los resultados de los análisis, como en los equipos utilizados. De ahí que la molienda de la muestra hasta lograr el menor tamaño de grano posible sea fundamental.

Posteriormente, los elementos mayores se determinaron por la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-OES, mientras que los elementos traza se determinaron también mediante dicha técnica, además de por la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS. El material volátil se determinó por calcinación a 950°C.

Los resultados del informe emitido por el laboratorio (referencia: 157599) del Servicio General de Análisis Químico Aplicado (USAL), se muestra en la tabla 2 y están expresados en porcentaje (%) y en partes por millón (ppm).

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Elementos mayores	Martinamor 1 (%)	Martinamor 2 (%)
Al ₂ O ₃	14.43	13.71
CaO	0.63	0.16
Fe ₂ O ₃	0.70	0.64
K ₂ O	4.48	4.7
MgO	0.14	0.09
MnO	0.02	0.01
Na ₂ O	3.61	3.77
P ₂ O ₅	0.19	0.24
SiO ₂	71.94	72.01
TiO ₂	0.07	0.07
Material volátil	1.90	0.9
Elementos traza	Martinamor 1 (ppm)	Martinamor 2 (ppm)
Ba	228	67.6
Cu	*	*
Li	115	148
S	*	*
Sr	116	146
Zn	5	*
Co	*	46
Cr	27	83
Ni	*	28
U	5	*
Th	8	*
Nb	4	94
Rb	203	240

* Elementos no detectados

Lo más significativo de los resultados es que no hay una elevada cantidad de material volátil que indique alteración química.

El principal compuesto químico de ambas muestras, con una proporción en torno al 72% es el SiO_2 , que a su vez es el principal componente del cuarzo, siendo este el mineral más resistente y menos susceptible de sufrir alteración química.

La baja proporción de CaO , menor del 1%, indica que no hay plagioclasa cálcica, siendo este un mineral proclive a sufrir alteración química. (López Plaza *et al.*, 2007).

Las proporciones de K_2O y Na_2O , componentes de los feldespatos se encuentran ambas en torno al 4%.

Hay una proporción significativa de Al_2O_3 , de un 14.43% para la roca localizada en las canteras y un 13.71% para la roca presente en las construcciones. Al ser ligeramente menor la proporción en el medio urbano, no se puede interpretar que el contenido en Al_2O_3 sea producto de alteración ya que debería ser mayor en el medio urbano que en la roca fresca. Su origen está en la composición del magma a partir del cual se originó la roca.

La proporción de Fe_2O_3 , menor del 1% y de MgO , menor de 0.15% indica que no hay alteración por oxidación.

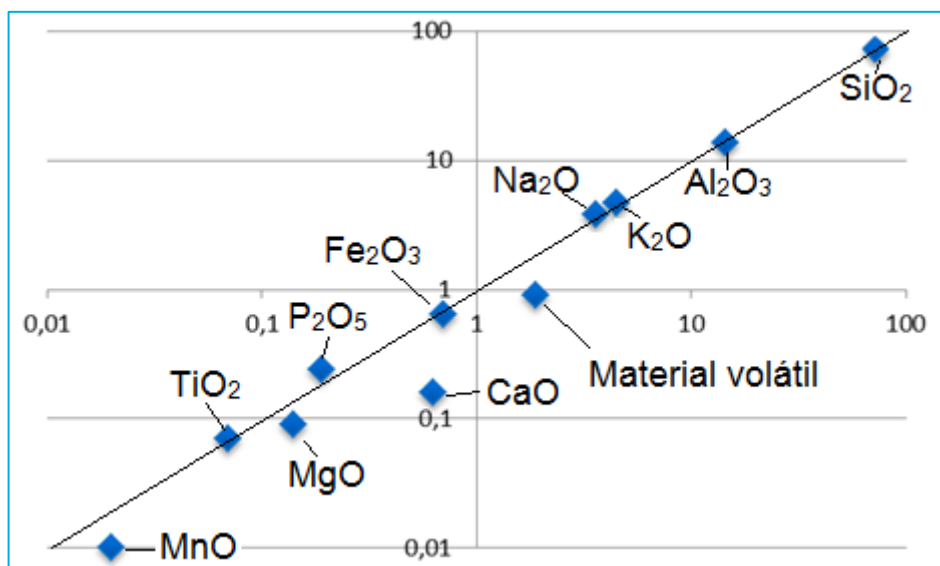


Figura 9. Diagrama de dispersión entre la composición química de la muestra de cantera “*Martinamor 1*” (en el eje de abscisas) y la muestra de la construcción histórica “*Martinamor 2*” (en el eje de ordenadas). Datos extraídos de la tabla 2, en porcentaje.

Si comparamos la composición entre las dos muestras (figura 9) existe una pequeña reducción de material volátil, CaO , MgO y MnO en la muestra de construcción respecto a la de canteras.

Respecto a las proporciones de elementos traza, sólo se observa un aumento evidente en algunas trazas como Co, Cr y Nb que podrían estar relacionados con una contaminación antrópica debido al contexto en el que se haya el edificio de estudio, pero no se tienen suficientes evidencias para ser más concretos al respecto.

Con estos datos, se interpreta que no hay indicios de alteración química en ninguna de las muestras y por lo tanto tampoco se puede concluir que las pequeñas diferencias de composición entre las muestras, de algunos elementos, sean consecuencia de la alteración química.

6.2 ANÁLISIS MINERALÓGICOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X por el método de polvo permite determinar cualitativamente los minerales presentes en la muestra de roca y hacer posteriormente una estimación cuantitativa de sus proporciones relativas. Conociendo las proporciones de minerales susceptibles de alteración y la presencia de minerales producto de alteración se puede determinar si ha habido alteración química. Además como se dispone de muestra de roca fresca (sin alterar) procedente de las canteras y muestra de roca alterada procedente del medio urbano de Salamanca se puede hacer una comparación entre ellas.

Por ello, las muestras “*Martinamor 1*” y “*Martinamor 2*” se llevaron a analizar al Servicio General de Difracción de Rayos X de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, que cuenta desde mayo de 2011 con la certificación de calidad según la norma UNE-EN ISO 9001.

Los resultados recibidos de parte del laboratorio consisten en dos difractogramas con el ángulo de difracción 2θ en el eje de abscisas y el número de cuentas en el eje de ordenadas. Donde el ángulo 2θ , es el ángulo entre la dirección incidente de los rayos en los microcristales del polvo de roca y la dirección de los rayos difractados y el número de cuentas es la intensidad de los mismos. Así, los picos de los difractogramas, representan los distintos minerales presentes en la muestra y a partir de su intensidad se puede estimar su proporción relativa en la muestra.

Una vez realizada la identificación cualitativa de las fases minerales bajo la tutela del Dr. José Antonio Blanco Sánchez, cotutor de este trabajo, la interpretación de los difractogramas (figura 10) es la siguiente:

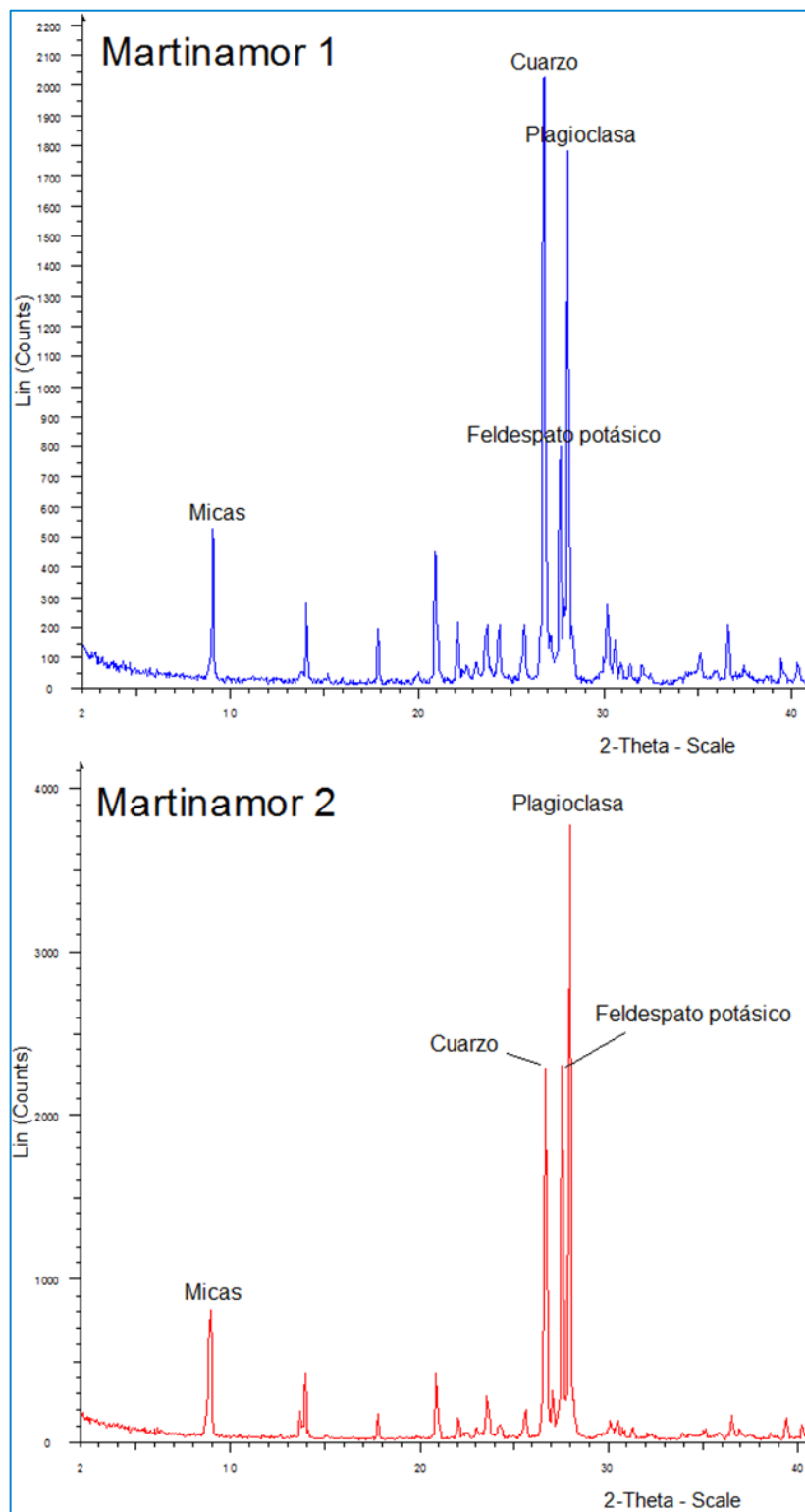


Figura 10. Comparación entre los resultados de difracción por rayos X en las muestras Martinamor 1 (en azul) y Martinamor 2 (en rojo).

Las proporciones estimadas de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, son algo diferentes en las dos muestras. Esto puede ser debido a:

- ✚ La heterogeneidad y baja representatividad mineralógica de la muestra “*Martinamor 2*”, debido al poco volumen de muestra alterada que se pudo recoger de la iglesia de San Juan de Sahagún, en comparación con la muestra de roca fresca “*Martinamor 1*” de la que se disponía de un buen volumen de roca.
- ✚ Que la Piedra Natural de Martinamor utilizada en la iglesia de San Juan de Sahagún y la muestra de roca fresca obtenida de las canteras sea una facies ligeramente diferente mineralógicamente.

Aun así, los resultados son útiles para interpretar que no hay alteración química significativa en ninguna de las muestras debido a que la plagioclasa es componente principal en ambas, además si hubiera alteración química a la izquierda del pico de las micas deberían aparecer los picos indicadores de los minerales de la arcilla caolinita e illita, producto de la alteración de los feldespatos.

6.3 IDENTIFICACIÓN PETROGRÁFICA

En la descripción petrográfica al microscopio realizada por López Plaza *et al.*, 2007 se hace referencia a la deformación sufrida por la roca en los procesos orogénicos posteriores a su formación, identificada a partir del cuarzo, que presenta extinción ondulante y subgranos, señales de una fuerte deformación plástica. Sin embargo, no se indica en ningún momento que haya signos de alteración, más bien lo contrario, haciendo alusión a la ausencia de minerales máficos y plagioclasa cálcica, que son minerales más proclives a la alteración.

Para la identificación de la alteración que ha tenido lugar en las canteras, mediante observación al microscopio petrográfico, se dispuso de tres láminas delgadas, pertenecientes al mismo bloque de roca del que se extrajeron las probetas ensayadas en la caracterización físico-mecánica publicada por Pereira *et al.*, 2015.

La observación de las láminas se realizó en el Área de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca.

Como se muestra en la figura 11, en los núcleos de las plagioclasas y los feldespatos potásicos hay presencia de una muy leve o leve alteración por sericita-caolinita-illita que da un aspecto de manchado a la lámina en nódulos paralelos y tiene forma de agregado mineral microcristalino en nódulos cruzados.

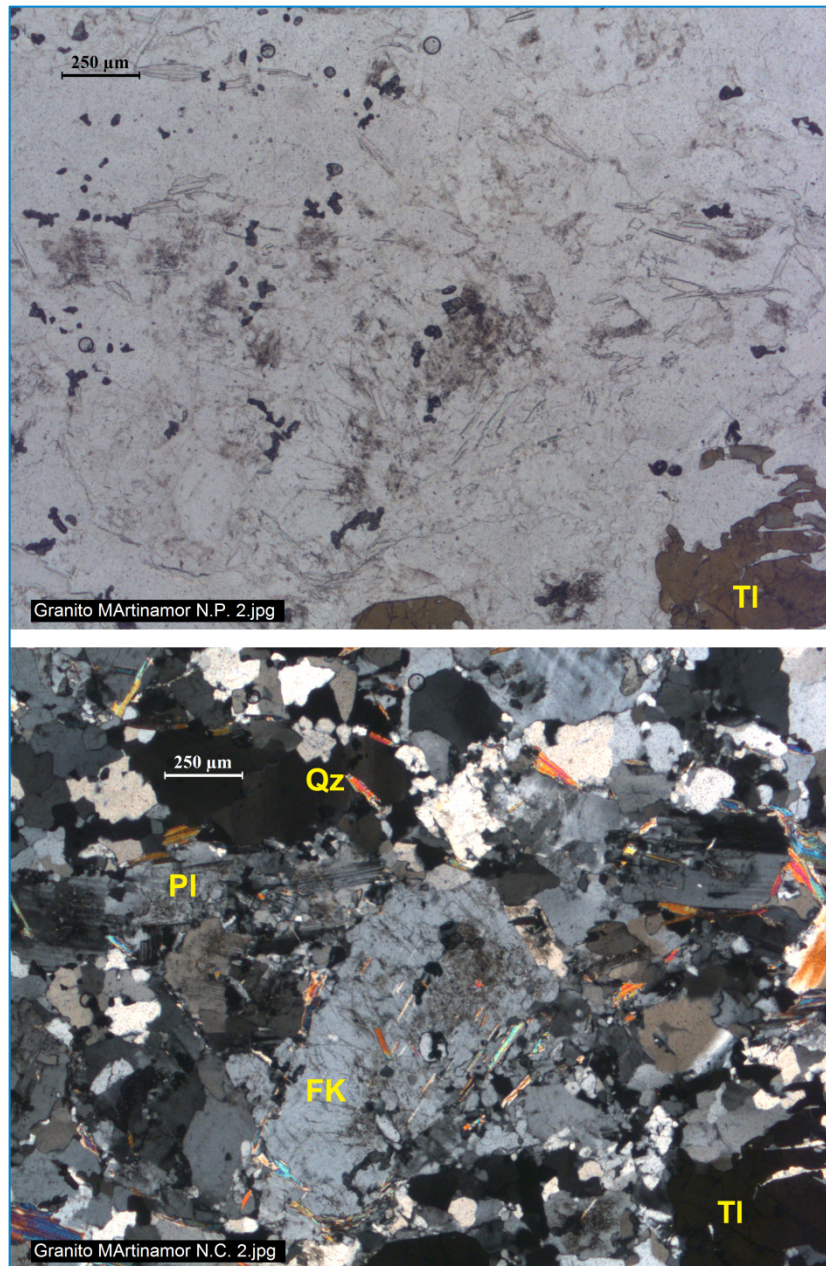


Figura 11. Signos de alteración en lámina delgada del Granito de Martinamor en nícoles paralelos (arriba) y nícoles cruzados (abajo).
Donde, Qz=cuarzo, Pl=plagioclasa, FK=feldespato potásico y
TI=turmalina. Fotografía: D. Marinero Domingo.

La sericita no es propiamente un mineral, sino un término que hace referencia a un agregado de varios minerales, como micas blancas degradadas por pérdida de potasio del tipo moscovita, o minerales del grupo de las arcillas. La caolinita y la illita son minerales del grupo de la arcilla que se forman a partir de la sericita, siendo el producto más abundante de la alteración química de los feldespatos en las rocas graníticas.

6.4 IDENTIFICACIÓN MACROSCÓPICA

A las etapas anteriores de caracterización de la alteración, se le pueden añadir los siguientes términos de identificación macroscópica de alteraciones que se han observado *"In situ"* en la Piedra Natural de Martinamor colocada en las construcciones históricas de Salamanca:

- ✚ **Alteración cromática:** se manifiesta con morfologías diversas de variación de los parámetros que definen el color natural de la piedra. Puede indicar varios fenómenos de alteración, por ejemplo, el color oscuro se identifica con presencia de materia orgánica por alteración biológica, el color rojizo se identifica con procesos de oxidación, etc. Se puede observar en las figuras 8 y 12
- ✚ **Pérdida de material:** es la ausencia de material de la superficie de la piedra. Se da por procesos de erosión que pueden actuar en solitario arrancando y transportando fragmentos de roca o en conjunto con procesos de meteorización. Se puede observar en las figuras 8 y 12.
- ✚ **Despegue o separación:** es el despegue de capas superficiales de la piedra y que puede incluir la caída de material. Las costras o placas son una capa superficial de la piedra, de material alterado, distinguible de las partes interiores por las características morfológicas y a menudo por el color. Se puede observar en las figuras 8 y 12.



Figura 12. Signos de alteración macroscópica en la piedra natural de Martinamor en la Catedral de Salamanca en los que se identifica, leve alteración cromática y pérdida de material por despegue de capas superficiales. Fotografía: D .Marinero Domingo.

6.5 VISITA A LAS CANTERAS

Debido a que actualmente trabajos específicos proponen la conservación de las canteras históricas de Martinamor y el uso del granito como material de reemplazo en obras específicas de restauración de patrimonio (Pereira y Cooper, 2014 y Pereira *et al.* 2015) se ha realizado una visita al área de las Canteras de Martinamor con la finalidad de obtener una idea general acerca de su estado actual, ya que es importante conocerlo por su influencia en la elaboración de las propuestas sobre su posible utilización.

Como indica Almeida Cuesta (1999), las canteras históricas del Granito de Martinamor se localizan en dos lugares diferentes, uno al Sur del núcleo urbano de Martinamor, conocido como “*Canteras del Pueblo*” 40°48'17.1"N 5°36'05.4"W y otro al Oeste del núcleo urbano, conocido como “*Canteras del Tío Bernabé*” 40°48'16.9"N 5°36'25.1"W.

En la visita se comprobó “*in situ*” el estado actual de ambas canteras:

- ✚ “**Canteras del Pueblo**”: su estado actual es el de abandono y consiste en un afloramiento de reducidas dimensiones en el que se pueden ver las tres facies graníticas. Como se ve en la figura 13, se trata de un banco de explotación de la facies leucogranito turmalinífero de grano grueso utilizada en construcción con una altura de banco de no más de 2 metros. En esta facies se identifican estructuras magmáticas subhorizontales, manifestadas por la orientación de los nódulos de turmalina. El cuerpo granítico se encuentra fracturado, horizontalmente por el efecto de descompresión y verticalmente por efecto de los procesos orogénicos posteriores a su formación. Por otra parte el antiguo frente de explotación (figura 13) se sitúa en el borde de un camino y está limitado en su borde superior por una finca privada.



Figura 13. Frente de explotación de un solo banco de la facies leucogranito turmalinífero de grano grueso en las “*Canteras del Pueblo*”

✚ **“Canteras del Tío Bernabé”**: estas canteras comprenden un área mucho mayor que las anteriores. Como se ve en la figura 14, existen varios cortes del terreno, correspondientes a la explotación por bancos que se ha realizado a lo largo de la historia en el lugar, donde se aprecia a primera vista que el mayor volumen de roca utilizado en las construcciones históricas de Salamanca y alrededores se ha tenido que extraer de estas canteras. Actualmente, todo el terreno que ocupan los afloramientos de estas canteras, está dedicado al uso ganadero tratándose de una finca privada y delimitada mediante vallado.



Figura 14. Cortes del terreno por explotación en bancos de Granito de Martinamor en las “*canteras del tío Bernabé*”. Fotografías: D. Marinero Domingo.

7. CONCLUSIONES GENERALES

Recordando los objetivos iniciales, en cuanto a la baja calidad de las propiedades físico-mecánicas de la roca fresca extraída de bloques superficiales de las canteras (Pereira *et al.*, 2015), se concluye de los resultados de los trabajos realizados, que no hay ningún indicio o signo de que se haya producido alteración química que sea la responsable de tan pobres propiedades físico-mecánicas.

Como causa más probable de estos resultados, en especial de los altos valores de porosidad, coeficiente de absorción de agua y coeficiente de absorción de agua por capilaridad, se señala a la fuerte deformación tectónica que ha sufrido el Granito de Martinamor desde su formación y que ha conferido a la roca una fuerte deformación plástica, fisuración y anisotropía.

Cabe destacar que el ensayo para obtener el coeficiente de absorción de agua por capilaridad según la norma UNE-EN 125:1999, establece que se deben obtener dos coeficientes, C_1 para la absorción perpendicular a los planos de anisotropía de la roca y C_2 , para la absorción paralela a los planos de anisotropía de la roca. Sin embargo, en las caracterizaciones físico-mecánicas publicadas solo se encuentra un coeficiente, sin saber si es el C_1 o el C_2 . Su alto valor, hace pensar que se trataría del coeficiente C_2 , que sería el paralelo a la deformación de la roca y por lo tanto el más desfavorable.

Debido a que la caracterización físico-mecánica publicada por López Plaza *et al.*, 2007, no hace referencia a ninguna normativa a la hora de realizar los ensayos, ni a la recogida de muestras, no se puede hacer una comparación concluyente que determine las diferencias respecto a la caracterización publicada por Pereira *et al.*, 2015. Podría deberse a que en la realización de los ensayos se tuviera en cuenta, de algún modo, la anisotropía de la roca.

Respecto a la caracterización de la alteración, tras concluir que no hay alteración química, ni en las canteras ni en los monumentos, de los trabajos de identificación macroscópica, sí que se ha observado que en las canteras, los afloramientos de roca en la superficie, están altamente fracturados, tanto por la descompresión y los esfuerzos tectónicos, como por alteración física.

Por otro lado, en las construcciones históricas, por lo general el comportamiento observado de la Piedra Natural de Martinamor es bastante bueno y cumple su cometido de aislar a la piedra suprayacente de la humedad del suelo. Esto se debe principalmente a que la piedra se ha colocado con los planos de anisotropía orientados horizontalmente. Ejemplo de este buen comportamiento es la Catedral de Salamanca (figuras 5 y 11). De alteración física, solo se identifican efectos superficiales leves-moderados, como se puede ver en las figuras 8 y 11, sin que en ningún caso afecten a la capacidad estructural de las piezas de sillería.

8. PROPUESTAS Y ALTERNATIVAS

Como se indica al inicio del trabajo, actualmente existen publicaciones sobre el Granito de Martinamor en las que se propone:

- ✚ Su candidatura a ser designado como “*Global Heritage Stone Resource*” (Recurso Natural Global en Patrimonio).
- ✚ Su utilización puntual en futuras restauraciones de construcciones históricas que deban acometerse.

En función de las conclusiones llegadas en este trabajo, las propuestas de acuerdo a las posibilidades de este granito son las siguientes:

- ✚ Realizar una nueva caracterización completa de las propiedades tecnológicas del Granito de Martinamor según la normalización UNE-EN, con la finalidad de que pueda ser designado como Recurso Natural Global en Patrimonio y dentro de esta designación, comparado con otras piedras naturales a nivel europeo. Se recomienda que las probetas de roca fresca se extraigan teniendo en cuenta la anisotropía de este granito y que la caracterización físico-mecánica incluya:
 - Porosidad abierta y densidad aparente.
 - Porosidad total y densidad real.
 - Resistencia a compresión.
 - Coeficiente de absorción de agua.
 - Coeficientes de absorción de agua por capilaridad, C_1 y C_2 .
 - Módulo de elasticidad (debido a la utilización de la piedra como pieza de sillería).
 - Resistencia a las heladas (debido a la localización geográfica de las canteras).
- ✚ En caso de que la Piedra Natural de Martinamor sea objeto de futuras restauraciones, se recomienda realizar como alternativa, tratamientos de recuperación y mejora de la roca en las propias piezas originales, antes que su sustitución debido a las dificultades que se presentarían ante la necesidad de extraer nuevos bloques de roca en las canteras, como sería obtener el permiso o el interés del o los propietarios de las fincas para realizar la extracción, realizar todos los trámites y obtener los permisos de la Administración necesarios para la explotación, realizar un proyecto de explotación que incluya la rehabilitación de las canteras, etc.

9. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Gavilán, G.; Bragado González, M.; Menéndez Bueyes, L. R.; Rodríguez Alonso, M. D.; Bartolomé, M.; Hernández Fernández, H.; *UTILIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LA Fm ARENISCAS DE SALAMANCA (CRETÁCICO TERMINAL-PALEOCENO) EN LA CALZADA Y SILLARES DEL PUENTE ROMANO DE SALAMANCA: ANÁLISIS GEOARQUEOLÓGICO*. Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. 2011.

Alonso Gavilán, G.; Villalaín, J. J.; Soto, R.; Calvo-Rathert, M.; Bartolomé, M.; Molina Ballesteros, E. y García Talegón, J.; *APROXIMACIÓN A LA CRONOLOGÍA DE LA Fm ARENISCAS DE SALAMANCA (SO DE LA CUENCA DEL DUERO) A PARTIR DE ESTUDIOS PALEOMAGNÉTICOS*.

Ariza, María Jesús. *MATERIALES INDUSTRIALES, INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL – MECÁNICA*. Apuntes académicos. Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería.

ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS. Departamento de Petrología y Geoquímica (Universidad Complutense de Madrid).

Del Arco, M.; Carballo, A. M.; Holgado, M. J.; Martín, C. y Rives, V.; *A MICROPOROSITY STUDY OF VILLAMAYOR SANDSTONE*. Salamanca, Spain. Applied Clay Science, 2–4, 375–383. 1987.

Díez Balda, M. A.; Martínez Catalán, J. R. y Ayarza, P. *SYNCOLLISIONAL EXTENSIONAL COLLAPSE PARALLEL TO THE OROGENIC TREND IN A DOMAIN OF STEEP TECTONICS: THE SALAMANCA DETTACHMENT ZONE (CENTRAL IBERIAN ZONE, SPAIN)*. J. STRUCTURAL GEOLOGY, 17: 163-182. 1995.

Díez Balda, M. A.; *EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVÁQUICO LAS SERIES PALEOZOICAS Y LA ESTRUCTURA HERCINICA AL SUR DE SALAMANCA*. Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. 1986.

Dirección General de Industria. *INFORME sobre MARCADO CE DE PRODUCTOS DE PIEDRA NATURAL*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2010.

Tarbuck, E. J. y Lutgens F. K.; *CIENCIAS DE LA TIERRA UNA INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA FÍSICA*. Madrid. Pearson Educación S. A.; 2005.

Fort, R.; *LA PIEDRA NATURAL Y SU PRESENCIA EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, (17.1) 16-25. 2009.

Hernández-Gutiérrez, L.E., Santamarta, J.C., Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Piñero-García, A. *PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DEL TERRENO*. Universidades de Alicante y de La Laguna. <http://web.ua.es/es/ginter/> ó <http://ocw.ull.es/> (fecha de acceso). License: Creative Commons BY-NC-SA. 2013.

Higueras, P. y Oyarzun, R.; *MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA AMBIENTAL: INTRODUCCIÓN AL CURSO*. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.

Iñigo, A. C.; García-Talegón, J.; Trujillano, R.; Molina, E. y Rives. *EVOLUTION AND DECAY PROCESSES IN THE VILLAMAYOR AND ZAMORA SANDSTONES*. CSIC, Madrid. Editorial: Applied study of Cultural Heritage and Clays. 2003.

López Jimeno, C.; *MANUAL DE ROCAS ORNAMENTALES*. Madrid. Editorial López Jimeno. 1995.

López Plaza, M.; García de los Ríos Cobo, J. I.; López Moro, F. J.; González Sánchez, M.; Iñigo, A. C.; Vicente Tavera, S.; Jiménez Fuentes, E.; *LA UTILIZACIÓN DEL GRANITO DE LOS SANTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA*. Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. 2009.

López Plaza, M.; González Sánchez, M.; Carlos Iñigo, A.; *LA UTILIZACIÓN DEL LEUCOGRANITO TURMALINÍFERO DE MARTINAMOR EN LOS MONUMENTOS DE SALAMANCA Y ALBA DE TORMES*. 2007. Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. 2007.

Mata López, M^a I.; *LA PIEDRA NATURAL EN LA ARQUITECTURA MODERNA: NORMATIVA APLICABLE PARA LA UTILIZACIÓN DE PIEDRA NATURAL*. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Madrid. 2010.

Menéndez Bueyes, L. R. *EL PUENTE ROMANO DE SALAMANCA Y SU CONTEXTO HISTÓRICO (A PROPÓSITO DE CIL II 4685)*. Memorias de Historia Antigua, XXI-XXII: 149-183. (2005).

Mingarro Martín, F.; *DEGRADACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO*. Madrid. Editorial Complutense S.A. 1996.

Nespereira, J.; Blanco, J.A.; Yenes, M. y Pereira, D. *OPAL CEMENTATION IN TERTIARY SANDSTONES USED AS ORNAMENTAL STONES*. Engineering Geology vol. 115, 167-174. 2010.

Núñez Paz, P.; Redero Gómez, P y Vicente García, J. *SALAMANCA. GUIA DE ARQUITECTURA*. Colegio Oficial de Arquitectos de León. 2001.

Ordaz, J.; *CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ALTERABILIDAD DE LA PIEDRA DE VILLAMAYOR (SALAMANCA)*. Oviedo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1983.

Pancorbo, F J.; *CORROSIÓN, DEGRADACIÓN Y ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA EDIFICACIÓN*. Barcelona. Editorial Marcombo S.A.; 2011.

Pereira, D. y Cooper, J.; *BUILDING STONE AS A PART OF A WORLD HERITAGE SITE: 'PIEDRA PAJARILLA' GRANITE AND THE CITY OF SALAMANCA, SPAIN*. London. Geological Society, Special Publications 2014, v.391. 2014.

Pereira, D.; Gimeno, A. y Del Barrio, S.; *PIEDRA PAJARILLA: A CANDIDACY AS A GLOBAL HERITAGE STONE RESOURCE FOR MARTINAMOR GRANITE*. London. Geological Society, Special Publications, 407, 93–100. 2015.

Vicente, M. A. y Brufau, A.; *WEATHERING OF THE VILLAMAYOR ARKOSIC SANDSTONE USED IN BUILDINGS UNDER A CONTINENTAL SEMI-ARID CLIMATE*. Applied Clay Science, 1–3, 265–272. 1986.